



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Modelagem de indicadores urbanísticos de áreas verdes a partir de imagens de veículo aéreo não tripulado – VANT

Alarcon Matos de Oliveira¹, Lusanira Nogueira Aragão de Oliveira², Carlos Alberto Oliveira Brito³

¹ Doutor em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo (USP), alarconmatos@gmail.com; ² Doutoranda em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo (USP), lnaragao21@gmail.com; ³ Mestre em Ciências Contábeis, Fundação Visconde de Cairu, caobrito@uol.com.br

Artigo recebido em 17/06/2024 e aceite em 05/02/2025

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar os índices urbanísticos (Índice de Áreas Verdes – IAV; Índice de Cobertura Vegetal – ICV e Percentual de Cobertura Vegetal – PCV), além de construir modelos estatísticos ambientais urbanísticos a partir de imagens produzidas por veículo aéreo não tripulado, no centro urbano de Feira de Santana/BA, uma vez que, as áreas verdes desempenham importante papel para a qualidade de vida urbana. Foram construídos modelos estatísticos ambientais urbanísticos a partir de imagens produzidas por veículo aéreo não tripulado, do centro urbano de Feira de Santana. Com a obtenção dos modelos, observou-se que o primeiro índice, o IAV, ficou além do recomendado pelas Organização das Nações Unidas (ONU) e Organização Mundial da Saúde (OMS) que é de 12m²hab⁻¹, onde foi encontrado um índice de 13 m²hab⁻¹, já o ICV foi razoável, em torno de 5,51 m²hab⁻¹, todavia, o terceiro índice demonstrou que o centro urbano está muito próximo do deserto florístico, onde o recomendado é de 30% e o valor mínimo para ser considerado deserto florístico é de 5%. Assim, o valor do PCV encontrado no centro feirense foi de 5,09%, sendo necessárias medidas mitigatórias.

Palavras-chave: Modelos Ambientais; Áreas Verdes; Índices Espaciais.

Modeling of urban green areas indicators as from unmanned aerial vehicle images - UAV

ABSTRACT

This study aimed to analyze urbanistic indices—Green Area Index (GAI), Vegetation Coverage Index (VCI), and Vegetation Coverage Percentage (VCP)—and to develop environmental urbanistic statistical models based on images captured by unmanned aerial vehicles (UAVs) in the urban center of Feira de Santana, Bahia, Brazil. Green areas are essential for urban quality of life, making such analyses critical. The results revealed that the GAI exceeded the minimum recommendation of 12 m² per inhabitant set by the United Nations (UN) and World Health Organization (WHO), with a value of 13 m² per inhabitant. The VCI yielded a moderate value of approximately 5.51 m² per inhabitant. However, the VCP highlighted a concerning scenario, with the urban center bordering a floristic desert. While the recommended VCP is 30%, and the threshold for a floristic desert is 5%, the observed value was 5.09%. These findings underscore the urgent need for mitigation strategies to enhance green infrastructure in the region.

Keywords: Environmental Models; Green Areas; Spatial Indexes.

Introdução

Os estudos que caracterizam áreas verdes em ambiente urbano vêm sendo conduzida de forma

multidisciplinar, correlacionada com aspecto ambiental, em especial a ecologia urbana (He et.

al., 2024), contribuindo na compreensão das áreas verdes objetivando a melhoria da qualidade socioambiental. É consenso que áreas verdes no espaço urbano proporcionam diversos tipos de benefícios, tais como: proteção da qualidade da água, atenuação da poluição, conforto térmico, sonoro e lumínico, do ponto de vista paisagístico trás o conforto visual (Morawska et. al., 2021; Kumar et. al. 2024; Khalili et. al., 2024; Guo et. al, 2024; Liou et. al., 2024; He et. al., 2024). Já na perspectiva ecológica, as áreas verdes servem de abrigo para a fauna; amenização do desconforto psicológico causado pelas massas edificadas (Boulnd e Hunhammar, 1999; Jim, 1998; Nowak et. al. 1996; Sudha e Ravindranath, 2000; Tyrvainer, 1997; Zanin, Rosset e Dalavale, 2007; Yan et. al., 2024; Liou et. al., 2024, He et. al., 2024).

Mapear áreas verdes urbanas requer grandes níveis de detalhes, visto que as entidades representadas muitas vezes são: praças, parques, jardins (Souza et. al., 2021), elementos paisagísticos muito pequenos, necessitando grandes escalas. A técnica mais usual é medir à área da praça e copa de árvores utilizando trena, utilizar o raio médio calculando área em m². De acordo com Souza et. al. (2021) e Amaral e Ribeiro (2024) o índice para calcular as áreas verdes da área urbana é expressa pela quantidade de espaços livres de uso público em m², pela quantidade de habitantes que reside em uma determinada cidade. Também são utilizadas imagens de satélites de alta resolução, bem como fotografia aérea tradicional. Ambos são métodos robustos e consolidados (Kocan, 2021) mas possuem limitações, como imprecisão no primeiro caso e grandes despesas, para os demais, além disso, no caso das imagens de satélites têm-se as limitações das nuvens, além da resolução temporal. Para a utilização dos aviões é em muitos casos inviáveis economicamente para as gestões publicas municipal realizarem voos regulares objetivando esse mapeamento.

Dentro desse contexto, o veículo aéreo não tripulado – VANT surge como poderosa ferramenta de mapeamento de baixo custo, maior rapidez sem a limitação oriunda dos voos tradicionais ou das imagens de satélites e segundo Zhang et. al., 2019, Tagliarini et. al., 2021 e Santos et. al (2022) com elevada precisão e resolução. De acordo com Pan et. al. (2024) o VANT, recentemente, com sua alta resolução espaço-temporal, oferece suporte técnico para estudos fenológicos da vegetação, fornecendo dados de reflectância da superfície em alta resolução

espacial, possibilitando o monitoramento da fenologia em escala individual de árvore. Assim, a sua utilização para o mapeamento para flora urbana tem sido cada vez mais difundida.

A partir das premissas elencadas anteriormente, esse trabalho visou demonstrar a precisão do VANT aplicado ao mapeamento da vegetação urbana, para calcular os índices urbanísticos: Índice de Áreas Verdes Totais (IAV); Índice de Cobertura Vegetal (ICV); Percentual de Cobertura Vegetal (PCV), para o centro urbano de Feira de Santana – Bahia. Foram utilizadas imagens aéreas capturadas pelo Veículo Aéreo Não Tripulado – VANT, remotamente controlado multirrotor modelo *Phantom 4* pro.

As imagens foram restituídas, vetorizadas criando os seguintes layers: copa de árvores (praças, calçadas, canteiros centrais e árvores privadas) praças, canteiros centrais e quarteirões. Foram restituídas as áreas desses polígonos em m² e aplicado aos índices urbanísticos preconizado pela ONU e OMS, os dados populacionais foram adquiridos de acordo com último censo do IBGE realizado em 2010. De posse desses dados foram construídos modelos matemáticos que descrevem o comportamento dos índices ICV e PCV, estes modelos serviram para prever a real necessidade de reflorestamento urbano para o centro de Feira de Santana.

A utilização dessa técnica mostrou-se adequada, sendo possível identificar os índices urbanísticos para o centro urbano de Feira de Santana, em contra partida os índices calculados mostraram-se controversos, quando nas perspectivas destinadas a áreas verdes o índice foi muito bom, mas quando se leva em conta o percentual de cobertura vegetal temos um déficit de áreas verdes. Assim, esse trabalho estudou os índices urbanísticos (Índice de Áreas Verdes – IAV; Índice de Cobertura Vegetal – ICV e Percentual de Cobertura Vegetal – PCV, além de construir modelos estatísticos ambientais urbanísticos a partir de imagens produzidas por veículo aéreo não tripulado, no centro urbano de Feira de Santana.

Material e métodos

O município de Feira de Santana está localizado a 110 km de Salvador, no território de identidade Portal do Sertão (Figura 1) - região administrativa adotada pelo governo do estado da

Bahia. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010) Feira de Santana possui a população estimada em 2017 de 627.477 sendo

que, desse montante, 91% concentra-se na área urbana do município.

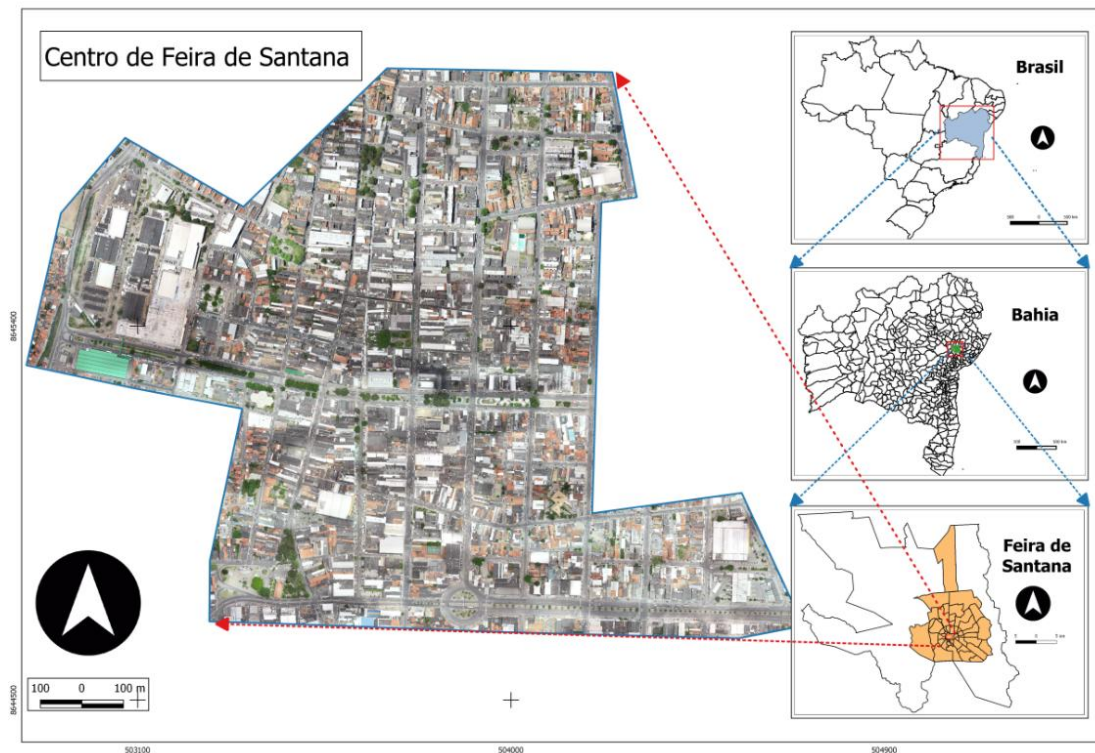


Figura 1 – Feira de Santana (BA): Mapa de localização do centro de Feira de Santana, bem como sua localização no estado, e no Brasil, 2021.

A condição climática de Feira de Santana é complexa por estar situada numa zona de transição entre domínios quentes úmido, caracterizados por florestas pluviais e o domínio de zona tropical, com estação seca definida (Santos 1993). O índice pluviométrico médio anual é de 802 mm, sendo a maior pluviosidade nos meses de março a maio com média máxima de 120 mm no mês de maio. Os menores índices pluviométricos estão entre os meses de agosto a outubro. Nos meses de novembro a janeiro é marcado pelas trovoadas,

com chuvas esporádicas e concentradas (Figura 2). A posição geográfica de baixa latitude garante, durante todo o ano, de forte radiação solar e elevadas temperaturas; a média térmica anual é de 24°C, sendo que o período quente se concentra nos meses de outubro a janeiro, onde as médias térmicas ultrapassam a 30°C. As menores temperaturas são registradas nos meses de junho a agosto com temperaturas médias 20°C a 23°C, portanto a amplitude térmica média é de 07°C (CEPLAC, 1975).

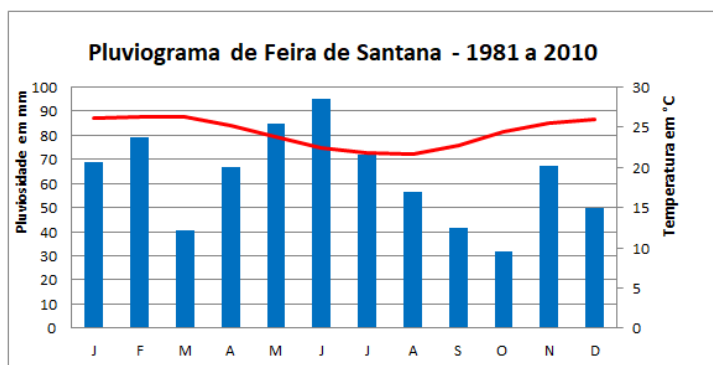


Figura 2 – Feira de Santana (BA): Pluviograma de Feira de Santana, da normal climatológica de Feira de Santana, 2021. Fonte: da Estação Climatológica – 88221 (UEFS).

Indicadores urbanísticos

Áreas verdes desempenham papel importante para as populações urbanas. De acordo com Aldogom et. al. (2020), as áreas verdes têm grandes efeitos ambientais e sociais na saúde dos moradores das áreas urbanas. A vegetação controla os efeitos adversos do ambiente urbano, contribuindo significativamente na qualidade de vida da população. Tais como: conforto térmico, sonoro e lumínico, quebra da monotonia das cidades, abrigo para fauna, amenização para o desconforto psicológico causado pelas massas edificações, entre outros (Bolund e Hunhammar, 1999; Jim, 1998; Nowak et. al. 1996; Sudha e Ravindranath, 2000; Tyrvainier, 1997; Morawska et. al., 2021; Kumar et. al. 2024; Khalili et. al., 2024; Guo et. al, 2024; Liou et. al., 2024). Logo, as áreas verdes determinam a necessidade crescente de serem manejadas como um recurso de uso múltiplo para benefício da população (Johnston, 1985; Milano, 1995). Neste sentido existem alguns indicadores urbanísticos servem como parâmetro de referências para as áreas verdes, são eles:

O índice de áreas verdes – IAV foi utilizado à equação proposta por Jantzen (1973) apud Hader (2006) onde é considerado o somatório das áreas totais das praças, expressa em metros quadrados, dividido pelo número de habitantes da área urbana considerada, sendo expressa pela equação 1:

$$IAV_{(area\ verde)} = \frac{\sum \text{área totais das praças e/ou canteiros centrais}}{N^{\circ} \text{ de habitantes da área urbana}} \quad (1)$$

No entanto o índice IAV não implica, necessariamente, numa boa arborização ou distribuição da mesma, sendo preciso quantificar a área da copa das árvores do espaço considerado, como proposto por Lima, Fonseca e Araújo, 2011; Harder, 2006; Nucci, 2001; Silva, Santos e Oliveira, 2016; Zanin, Rosset Dalavale, 2007, definida pela relação da área de copa das árvores dividida pelo número de habitantes do espaço considerado (equação 2).

$$ICV = \frac{\sum \text{Área das copa}}{N^{\circ} \text{ de habitantes da área urbana}} \quad (2)$$

IAV e ICV são índices que levam em consideração a densidade demográfica (Souza, et. al., 2021; Amaral e Ribeiro, 2024), todavia este último possui a limitação de não existir valor de referência, embora leve em consideração a cobertura vegetal, e não apenas áreas destinadas à mesma.

O Percentual de Cobertura Vegetal – PCV destaca-se por não está atrelado diretamente à densidade, mas a porcentagem da área foliar em relação à área do bairro (Equação 3). Segundo Sukopp & Werner (1991); Oke (1973); Gomes & Queiroz (2011), o valor do ICV deveria ser de aproximadamente 33%, em contrapartida valores inferiores a 5% são considerados desertos florísticos. Segundo Harder et. al. (2006); Milano (1990); Arruda et. al. (2013); Gomes & Queiroz (2011) consideram ICV podendo ser calculados, quantificando todas árvores dentro do perímetro estudado

$$PCV = \frac{\sum \text{das arvores das área verdes}}{\text{Área total do Bairro}} 100 \quad (3)$$

VANT na aquisição de fotografias aéreas

Para aquisição das imagens foi utilizado Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) modelo multirrotor, pois como ressaltam Zhang et. al. (2019), o VANT é parte de uma tecnologia de sensoriamento remoto de baixa altitude, que não sofre interferência de fatores atmosféricos durante o processo de aquisição de imagem, sendo adequado para a proposta do trabalho. Foram realizados quatro voos entre os dias 07 a 11 de outubro de 2019, sempre no período entre 11h00min às 14h30min, reduzindo as interferências da luz solar, na projeção das sombras. Foi definido GSD de 3 cm para que se possa identificar com precisão o limite das copas das árvores. A altura padrão de voo foi de 120 metros acima do solo, os pontos de decolagem em dois locais centrais que estivessem em raio máximo de 1,2km de nenhum ponto de controle, garantindo a comunicação e

controle de voo através da telemetria do equipamento.

A complexidade do espaço urbano implica em diversas variáveis capazes de interferir nos produtos cartográficos, como a presença de edifícios, movimentação de veículos, bem como as próprias instabilidades inerentes ao voo como o vento. Portanto foi adotada uma sobreposição frontal e lateral de 85% entre as imagens, para reduzir essas interferências, bem como reduzir ao máximo as distorções da imagem. Foi utilizado o georreferenciamento da imagem, com base na triangulação por pontos de controle, identificáveis no interior da poligonal mapeada, adotando sete pontos (Figura 3) não foram necessários mais pontos pois a área mapeada não é extensa, além de ser bastante plana. As coordenadas foram obtidas através do equipamento GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) de dupla frequência, utilizando o método RTK (*Real Time Kinematic*) e estático rápido. Os pontos identificáveis foram pintados em solo (Figura 3), suas coordenadas foram obtidas e pós-processadas.

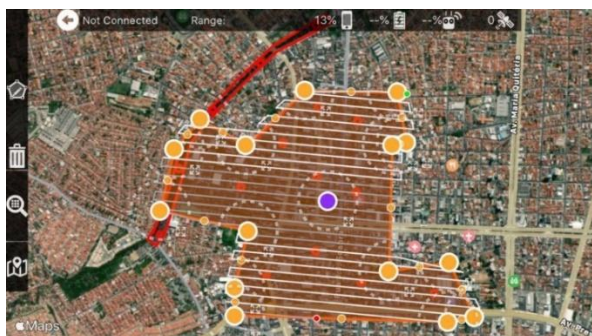


Figura 3 – Feira de Santana (BA): Plano de voo da área urbana, as marcas em vermelhos representam pontos de controle para georreferenciamento com o auxílio do GPS – RTK, 2020. Fonte: Secretaria Municipal de Planejamento – SPLAN.

O relatório de erros aponta a precisão do georreferenciamento (Tabela 1), todavia estão dentro dos parâmetros de exatidão cartográfica PEC A. Os RMS em E foi de 0,00442m; S 0,00459

em Z 0,009, totalizando RMS geral de 0,006m, logo 6mm para um GSD de 3 cm, ou seja, erro desprezível.

Tabela 1 – Feira de Santana (BA): Tabela com os pontos de controle, bem como os erros apresentados, 2021. Fonte: Secretaria Municipal de Planejamento - SEPLAN.

Pontos de Controle	Erro (m)			Erro Projetado (pixel)
	E	S	Z	
PC1	0	0	0,003	0,137
PC2	-0,002	0	-0,003	0,111
PC4	0,001	-0,007	0,003	0,16
PC5	0,001	-0,001	-0,001	0,145
PC7	-0,005	0,002	0,008	0,098
PC9	0,009	0,001	-0,006	0,106
PC10	-0,004	0,009	-0,021	0,256
Média (m)	0,00013	0,00063	-0,0024	0,145
Desvio-Padrão (m)	0,00442	0,00455	0,00867	0,0500
RMS (m)	0,00442	0,00459	0,009	0,0060

Foi utilizado para a escala de restituição de 1:1000, referenciados no Sistema de Projeção UTM, *datum* SIRGAS 2000 fuso 24 Sul. A vetorização consistiu em transformar os modelos de representação do tipo *raster* em modelo de dados espaciais do tipo polígono, com a finalidade de discriminar as classes e quantificá-las.

Vetorização e quantificação de polígonos.

Foram vetorizadas, criando os *layers*: Quarteirões, Praças, canteiros centrais que são utilizados como áreas de lazer e a copa de todas as árvores do perímetro estudado (Figura 4).

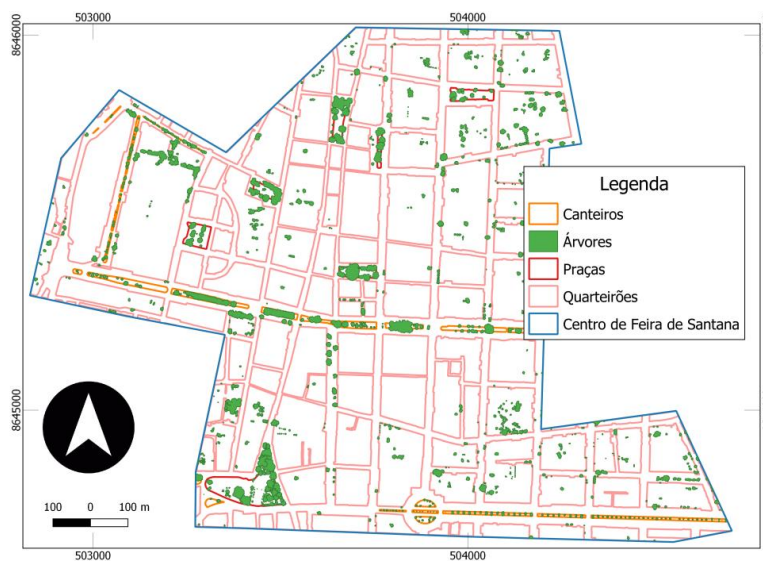


Figura 4 – Feira de Santana (BA): Vetores obtidos a partir das imagens adquiridas pelo VANT, 2021.

De posse dos polígonos foi possível quantificar em metros quadrados as entidades espaciais (canteiros, Árvores, Quarteirões, praças). Sendo assim, a área total das praças corresponde a 29.675,03m²; os canteiros possuem 24.100,11m²; quarteirões foram de 1.023.739,71m² à área total

do centro é de 1.542.832,48m², não foi vetorizado, mas foi possível quantificar, pela subtraindo as áreas vetorizadas da área total do polígono resultando nas áreas destinadas ruas e calçadas totalizando 465.317,63m² (Tabela 2).

Tabela 2 – Feira de Santana (BA): Quantificação dos polígonos em metros quadrados, na figura é possível perceber o percentual de cada elemento especial, 2021.

Entidades Espaciais	Área em m ²	Entidades espaciais
Ruas e calçadas	465.317,63	
Praças	29.675,03	
Canteiros	24.100,11	
Quarteirões	1.023.739,71	
Centro	1542832,48	

Já a copa das árvores foi também quantificada em função da sua localização – Árvores situadas nas praças; árvores situadas

nos canteiros centrais, árvores situadas nas calçadas, e árvores situadas em áreas privadas, ou seja, árvores nos quarteirões (Tabela 3).

Tabela 3 – Feira de Santana (BA): Área em metros quadradas da copa das árvores em cada setor do centro da cidade, 2021. Fonte: Os Autores.

Entidade Espacial	Área em m ²	Valor Acumulado m ²
Árvores das Praças	19.268,06	1.968,06
Árvores dos Canteiros	12.763,08	32.031,15
Árvores das Calçadas	14.641,36	46.672,52
Árvores Privadas	31.881,05	78.553,55
Total (Σ)	78553,55443	

Considerando essa disposição na distribuição das árvores (Figura 5), nota-se que a maior parte das árvores (41%) se encontra nos

quarteirões, ou seja, áreas privadas, seguida pelas áreas das praças com 24%, em menor percentual têm-se as árvores da calçada com 19% e 16% para árvores dos canteiros.

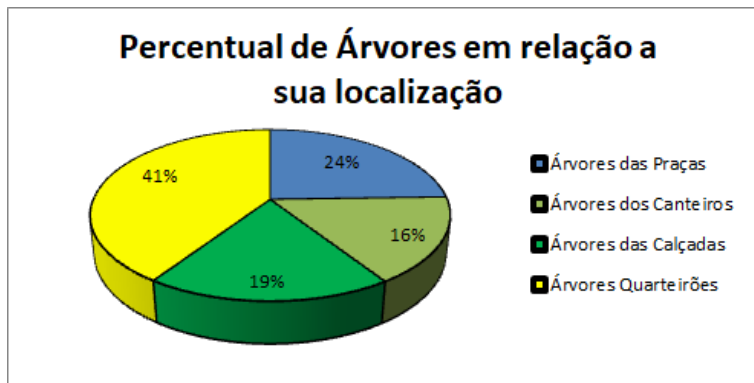


Figura 5 – Feira de Santana (BA): Distribuição espacial das copas das árvores em função da sua localização no centro de Feira de Santana, 2021. Fonte: Os Autores.

O dado de população foi do censo de 2010, referente ao setor censitário do centro, totalizando uma população residente de 5809 habitantes (IBGE, 2010). Gerando uma densidade demográfica de $0,004 \text{ hab.m}^{-2}$, o que equivale a $3764,9 \text{ haKm}^{-2}$. A densidade demográfica para o município inteiro é de $416,03 \text{ haKm}^{-2}$ e para o Brasil a densidade é de $23,8 \text{ haKm}^{-2}$ (IBGE, 2010). Por se tratar de área central, com diversas atividades comerciais há uma grande população flutuante, que não foi considerada para os efeitos de cálculos dos índices.

Pressupostos estatísticos para o modelo

Como ressaltam Prion e Heraling (2014) e Liu et. al. (2022) a regressão linear consiste na modelagem estatística entre duas colunas (variáveis de interesse), esses valores são calculados para os dados já medidos e representados graficamente. Contudo em alguns casos, para modelo de previsão faz-se necessário a construção de modelo matemático com a equação preditivas, resalta-se que essa modelagem não implica, necessariamente em relação casuísticas, esse resultado também pode significar (Prion e Heraling, 2014; Prion e Harling, 2020).

Sejam $Y_1, \dots, Y_n$ variáveis aleatórias que se pressupõem independentes, cada um com a função densidade ou função probabilidade na forma dada a seguir (Paula, 2013):

$$f(y_i; \theta_i; \phi_i) = \exp[\phi\{y_i\phi_i - b(\theta_i)\} + c(y_i, \phi)] \quad (04)$$

Segundo Paula, (2013) é possível mostrar em condições usuais de regularidade que:

$$E \left\{ \frac{\partial \log f(Y_i; \theta_i, \phi)}{\partial \theta_i} \right\} = 0 \quad (04)$$

E que:

$$E \left[\frac{\partial^2 \log f(Y_i; \theta_i, \phi)}{\partial \theta_i^2} \right] = -E \left[\left\{ \frac{\partial \log f(Y_i; \theta_i, \phi)}{\partial \theta_i} \right\}^2 \right]. \quad (05)$$

$\forall_i$, que $E(Y_i) = \mu = b'(\theta)$ e $\text{Var}(Y_i) = \Phi^{-1}V(\mu_i)$, em que $V_i = V(\mu_i) = d\mu_i/d\theta_i$ é a função de variância e $\Phi^{-1} > 0$ ($\Phi > 0$) corresponde ao parâmetro de dispersão (precisão)

Ao se traçar uma linha, através de cada gráfico da dispersão, podemos perceber na dispersão o alto grau de correlação, possibilitando prever onde os próximos pontos poderão se situar. Este método é conhecido como “mínimos quadrado”, isso devido ao fato de minimizar a distância de cada linha em relação ao ponto, acima ou a baixo, elevando ao quadrado a pontuação da variação para cada dado (Prion e Herling, 2020). É possível calcular a precisão a inclinação da linha, que corresponde a mudança de Y dividido pela a mudança de X, ao descobrir onde a linha interceptará o eixo vertical (Y), saberemos exatamente onde colocar a linhas, pois já é conhecida a sua inclinação.

Devido a estrutura da equação que descreve o modelo da regressão linear, os resultados será o valor previstos do Y (variável de critério) para um X conhecido (variável preditora). Prion e Herling (2020) apontam ainda que esse critério é útil para pontuação individual, mas não para análise geral da previsão, ou seja, o que é necessário saber quanto da variância em uma variável é explicada pela outra variável.

Todavia esses valores preditivos só terão significância se houver uma correlação estatística entre as variáveis. Para o coeficiente de correlação estamos em duas variáveis se comportam em relação a outra (semelhante à relação linear entre X e Y em um gráfico) (Prion e Herling, 2020). O cálculo de r de Pearson retorna um valor entre -1 a +1, sendo que o 0 representa ausência de relacionamento, quanto mais alto o valor absoluto do número, mais forte é a relação entre as variáveis.

Para Martins (2014) se representarmos o coeficiente de correlação amostral de Pearson por $(x,y) = \{(X_i, Y_i)\}$, com $i = 1, \dots, n$, em uma amostra de dados bivariados, o coeficiente de correlação amostral pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (06)$$

Onde $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ e $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ ou seja, o coeficiente de correlação para o par de variável (x,y) é o quociente entre a variância amostrais das variáveis x e y e o produto dos desvios padrões respectivos:

$$r = \frac{Cov(x,y)}{s_x s_y} \quad (07)$$

Uma correlação positiva implica que ambas as variáveis se movem na mesma direção, ou seja, são diretamente proporcionais. Para valores negativos implica dizer que há correlação negativa, são inversamente proporcionais (Prion e Herling, 2020). De maneira geral para interpretar os resultados da regressão adota-se o seguinte critérios: 0 a $\pm 0,2$ a correlação é insignificante, $\pm 0,21$ a $\pm 0,35$ a correlação é fraca; de $\pm 0,36$ a $\pm 0,67$ correlação moderada, $\pm 0,68$ a $\pm 0,9$ a

correlação é forte e entre $\pm 0,91$ a $\pm 1,0$ é classificado como muito forte (Prion e Herling, 2020; Taylor, 1990, Shavelson, 1996).

Havendo a correlação, positiva ou não, gerando a regressão linear, é possível mensurar o qual o poder preditivo do modelo. O coeficiente de determinação, também conhecido como R^2 , ou simplesmente de “Erre quadrado” para uma regressão linear simples, fornece informação auxiliar ao resultado da análise de variância da regressão, despontando como uma maneira de verificar se o modelo proposto é adequado ou para descrever matematicamente o fenômeno ou não. Segundo Levine et. al (2000) e Subramanian, Coutinho e Silva (2007) o R^2 pode ser expressando como:

$$r^2 = \frac{SQReg}{STQ} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (08)$$

Ainda segundo Charnet et. al. (1999) este coeficiente determina a proporcionalidade da variabilidade dos Ys observados explicada pelo modelo considerado em que o valor R^2 pertence ao intervalo entre 0 e 1. Sendo possível a representação em porcentagem, bastando multiplicar o resultado por 100 para ter o grau de acurácia do modelo.

Análise de resultados.

O IAV frequentemente vem sendo utilizado para comparar as quantidades de áreas verdes (praças, parques e jardins), em diferentes cidades em função do número de habitantes (Souza et. al., 2021). Considerando apenas à área das praças, propriamente ditas, o IAV para o centro de Feira de Santana foi de $5,1\text{m}^2\text{hab}^{-1}$ é considerado muito baixo, uma vez que a OMS e a ONU preconiza é que esse valor seja de $12\text{m}^2\text{hab}^{-1}$ (Arruda et. al., 2013; Amaral e Ribeiro, 2024). Desta forma, o valor encontrado corresponde apenas a 42,5% do esperando (Figura 6B).

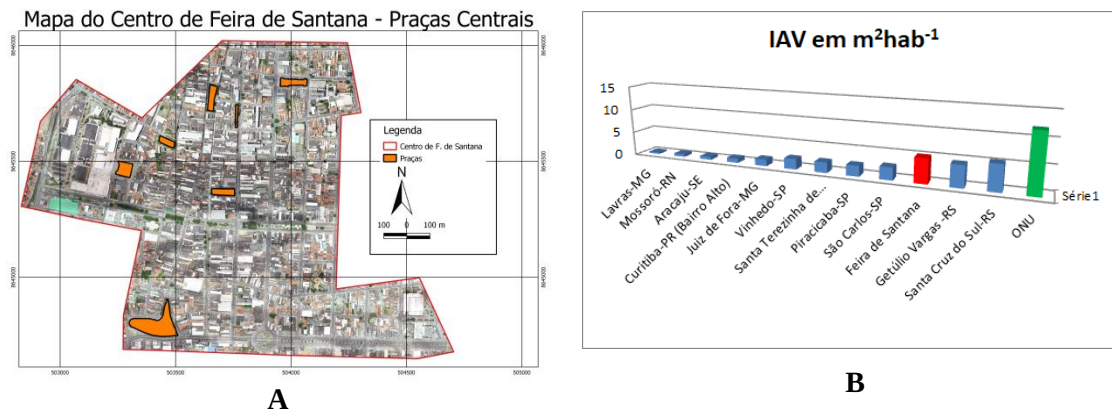


Figura 6 – Feira de Santana (BA): Em **A** tem-se à localização das praças do centro de Feira de Santana, em **B** é o IAV em comparação com algumas cidades brasileiras e com o recomendado pela ONU, 2021.Fonte: Os Autores.

Contudo, os canteiros centrais das principais avenidas, podem ser considerados verdadeiras praças esportivas, já que possuem diversas árvores, equipamentos de malhação, pista de *cooper*, *skate*, além de diversos bancos, portanto podem ser enquadrado como áreas verdes, já que existe área de recreação (Pereira e Loboda, 2020), logo passível de ser incorporado ao índice calculado. Sendo assim o $IAV_{(área\ verde)} = 13,7\ m^2hab^{-1}$ superando ao recomendado pela ONU em $1,7\ m^2hab^{-1}$ do que é preconizado, ou seja, 114,08% do índice (Figura 7).

Através da análise das figuras 06 e 07 e da equação 1, pode-se concluir que este índice

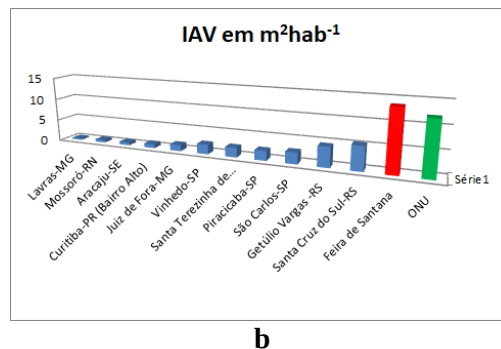
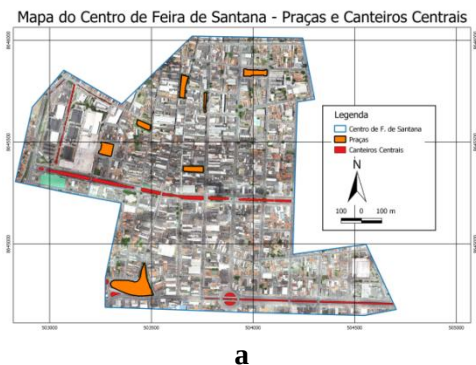


Figura 7 – Feira de Santana (BA): Em **A** o mapa das áreas verdes de Feira de Santana, incluindo os canteiros centrais. Em **B** o IAV para a área central, observa-se um valor elevado em comparação com os demais municípios, 2021. Fonte: Os Autores.

Se considerar apenas às praças como área verde, o ICV do centro de Feira de Santana é muito baixo (comparado a outros municípios – Figura 8A), atingindo $3,31m^2hab^{-1}$, todavia ao adicionar as áreas dos canteiros centrais o ICV fica em torno de $5,51\ m^2hab^{-1}$, quase o dobro do valor anterior,

equivalente a 166% em relação ao índice anterior, superando o ICV de alguns municípios (Figura 8B). A ONU considera ideal que os municípios, apresentem, no mínimo, $12\ m^2/hab$ de cobertura vegetal (Arruda et. al., 2013; Faustino et. al., 2019). Adicionando às árvores situadas na calçada o

índice sobe a $8,03 \text{ m}^2\text{hab}^{-1}$ gerando um acréscimo no índice de 145% ficando apenas atrás de Mossoró-RN dentre os municípios pesquisado é a cidade que possui melhor índice (Figura 8C). Sendo assim ao incluir essa demanda o índice de

cobertura vegetal do centro feirense atinge $13,52 \text{ m}^2\text{hab}^{-1}$ incrementando em 168% em relação ao índice anterior, superando todos os índices encontrados na literatura (Figura 8D).

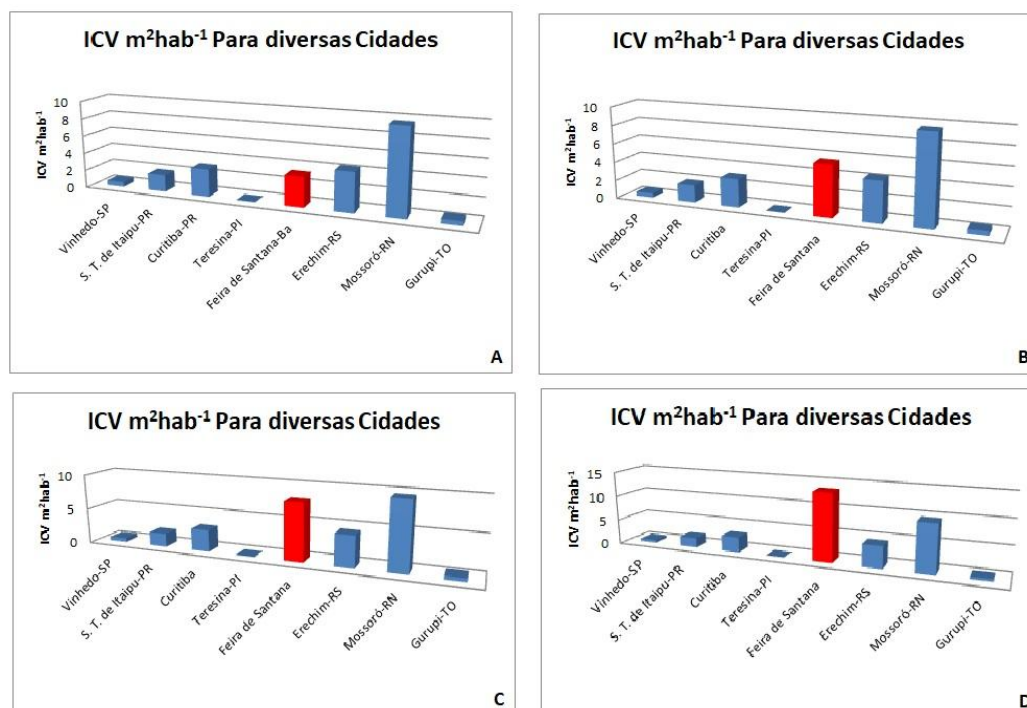


Figura 8 – Feira de Santana (BA): variação do ICV do centro de Feira de Santana e comparação com alguns municípios, 2021. Fonte: Os Autores.

Observando os valores obtidos na equação 3, considerando apenas às árvores das praças o PCV é de 1,24% muito baixo, no entanto, ao adicionar árvores dos canteiros centrais esse valor dobra atingindo 2,7%, porém ainda sendo considerado como deserto florístico. Ao considerar as árvores das calçadas em conjunto com as árvores das praças e canteiros centrais o PCV é equivalente a 3,02% , como ressalta Arruda et. al. (2013), muito

aquém do recomendado, mesmo se somássemos todas árvores (Praça, canteiros centrais, calçadas e árvores residenciais), ou seja, todas as árvores do espaço considerado o valor é de apenas 5,09%. Valor mínimo para não ser considerado com deserto florístico; isso pode ser observado na Figura 9 onde é perceptível a existência de poucas árvores.

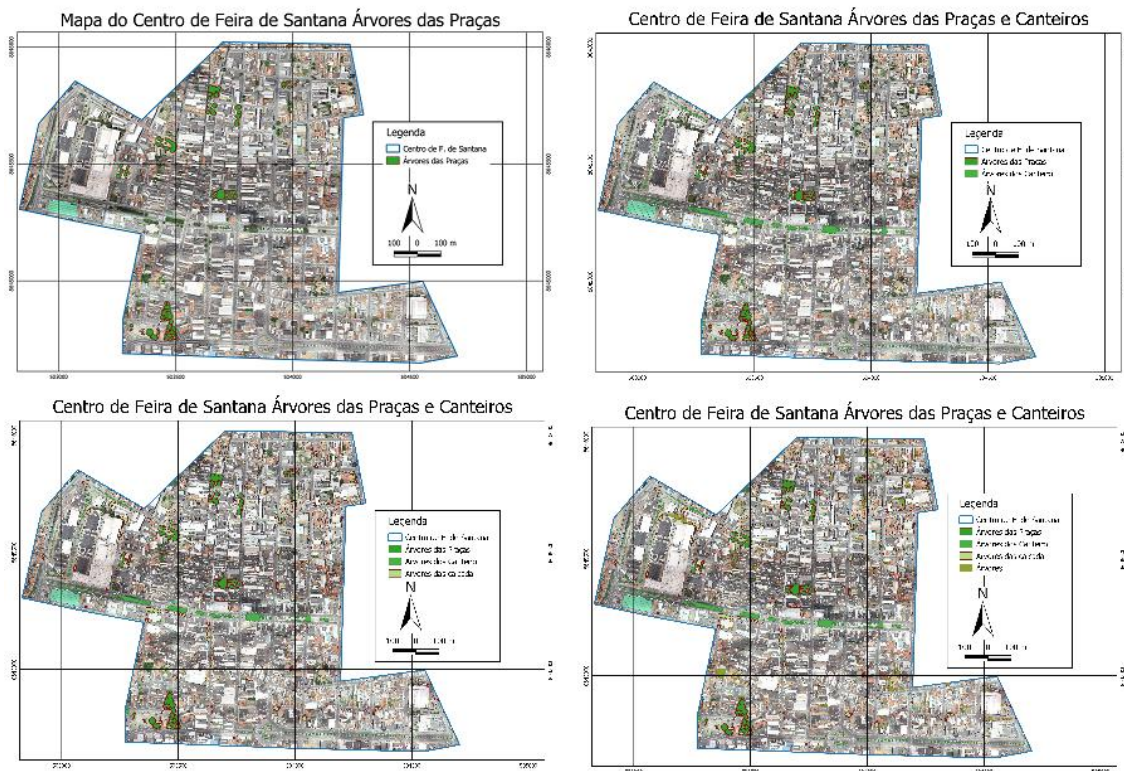


Figura 9 – Feira de Santana (BA): Relação entre área urbana e a área das copas. Demonstrando a pouca densidade da área de copa das árvores em relação centro de Feira de Santana, 2021.
Fonte: Os Autores.

A partir das análises do IAV e ICV, é possível concluir que Feira de Santana tem um excelente IAV e um razoável ICV, quando considerado todas as árvores (Arruda et. al., 2013; Faustino et. al., 2019; Amaral e Ribeiro, 2024). Todavia o centro de municipal tem deficiência no PCV. Isto é explicado, pois o centro de Feira de Santana, não é muito verticalizado, ocorrendo um espraiamento da população o que implica em um ICV, mas em PCV ruim.

Modelagem estatística

Como ressaltam Charnet, Bonvino e Freire (1999), Paula (2013) e Bratsberg, Thoresen e Ghosh (2025) é possível modelar

matematicamente, a partir da regressão linear, assim, o incremento ICV à medida que vai adicionando mais entidades espaciais (uso de solo) que contém áreas verdes, possibilitando escrever esse acréscimo exponencialmente na série equação $F(x) = 0,0002x - 0,0072$ graficamente é representado pela Figura 10, cuja R^2 foi de 1,0, logo excelente correlação entre valores plotados e a modelagem matemática do índice de ICV. Em outras palavras todos os dados de X explicam Y com uma exatidão de aproximadamente 100%. A correlação estática (R) entre X e Y (Uso de Solo e o ICV) foi de 0,99, indicando uma correlação positiva à medida que variamos positivamente os valores de uso de solo implicaria no aumento do ICV, já o erro padrão foi 0,000702375910041297.

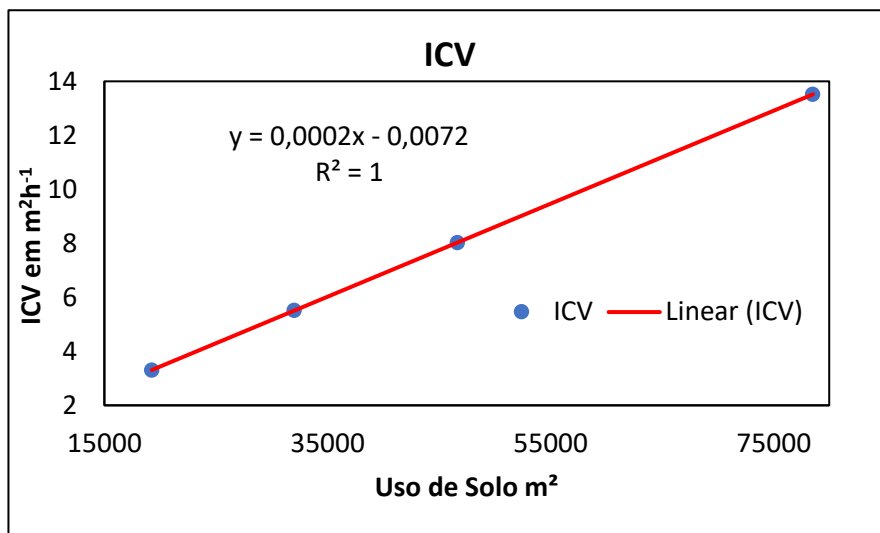


Figura 10 – Feira de Santana (BA): Modelo matemático de crescimento do ICV a média que se acrescenta as entidades espaciais (uso de solo). Fonte: Os Autores.

Já o modelo estatístico para PCV foi gerado gráfico cujo eixo x está plotado área em m² das copas das árvores, no eixo y foi plotado o PCV em %. A partir do gráfico (Figura 11) foi gerado o modelo matemático $f(x) = 0,0000065x - 0,00000006$ que apresenta o crescimento da área de copa à medida que vai acrescentando os elementos

espaciais (usos de solo) representativos das árvores, onde X é área em m² correspondente a copa das árvores. O R^2 desse modelo estatístico foi de 1, ou seja esse modelo tem excelente poder de previsibilidade com 100% certeza, a correlação das variáveis foi de 1 (positivo), ou seja, diretamente proporcional, o erro padrão foi $5,44 \times 10^{-08}$.

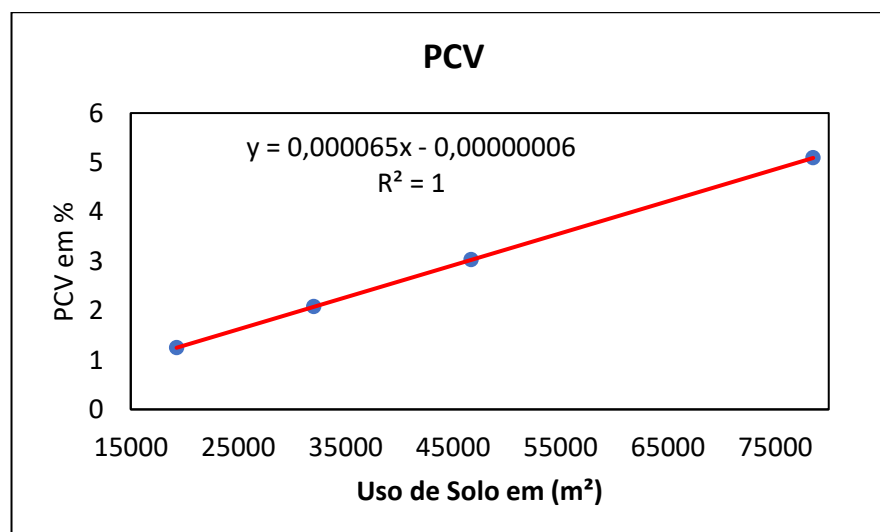


Figura 11– Feira de Santana (BA): representa a variação do PCV à medida que vai se adicionando mais entidades espaciais. Em vermelho a reta gerada pela regressão linear, os pontos azuis são a dispersão dos pontos amostrais. Fonte: Os Autores.

A partir da análise espacial das imagens aéreas, constatou-se que praças e canteiros, possuem boa cobertura vegetal, as áreas dos quarteirões (árvores privadas) são áreas comerciais ou de residências, com espaço urbano já

consolidado com poucas áreas para reflorestamento urbano. Logo, para atingir índice recomendado pela literatura de 30% (Lombardo, 1985; Garcia et. al., 2018; Faustino et. al., 2019) seria necessário reflorestar as calçadas em

aproximadamente 4x o valor atual, em torno de (427630,57m²) isso levando em consideração toda a vegetação da área estudada. Se desconsiderar as árvores das residências, por serem de propriedade particular, seria necessário um acréscimo de vezes as árvores das calçadas praças e canteiros centrais.

Considerando a necessidade em acrescentar vezes às árvores das calçadas, em muitos casos há impedimento devido ao centro municipal utilizar a distribuição de energia elétrica por fios aéreos, uma sugestão para reduzir o deserto florístico apontado no PCV, uma alternativa é adoção de telhados verdes (Penkova, Zimmerman e Gonzalés, 2020; Bonsere et. al., 2022; Dang et. al., 2022; Hussien et. al., 2023).

Considerações finais

Os veículos aéreos não tripulados vêm sendo cada vez mais usados para as atividades de mapeamento, isso devido à facilidade e alto grau de precisão espacial. Para o mapeamento da flora urbana, os trabalhos ainda são insuficientes, contudo, os resultados aqui adquiridos se mostraram satisfatórios, tanto do ponto de vista cartográfico, quanto urbanístico.

O levantamento aerofotogramétrico, e sua reambulação indicou precisão milimétrica, o que possibilitou a vetorização de pequenas feições, integrando ao polígono áreas antes não contabilizadas. Com a integração de pequenas regiões, a precisão do levantamento aumentou consideravelmente, logo o cálculo de área dos polígonos possibilitou que os índices urbanísticos fossem mais reais, o que implica numa melhor qualidade dos modelos, logo a tomada de decisão pode ser mais eficiente.

O IAV indicou excelente índice, resultado ficou além das expectativas, demonstrando que o centro de Feira de Santana possui diversos espaços verdes, com áreas destinadas a recreação e às práticas esportivas. Porém, algumas praças estão ocupadas por vendedores ambulantes, restringindo o acesso dos moradores a alguns equipamentos. Já o ICV se mostrou adequado à medida que se incorpora a copas das árvores que estão localizadas em áreas privadas, quando restritas aos espaços públicos o índice se reduz sensivelmente, isso é evidenciado através do modelo matemático linear. Contudo, esses dois índices (ICV e IAV) são índices que levam em conta a relação área x população, que se mostraram concordantes, mas

não são representativos quanto à área foliar x espaço urbano.

No que tange ao PCV, destaca-se por ser correlacionar área de copa com área estudada, além de existir índices comparativos, como referência. Pode-se constatar que o PCV do centro urbano do município é muito baixo. O valor percentual de áreas verdes é quase de áreas desérticas, (observável com o modelo matemático da regressão linear, onde à medida que se adiciona novos espaços o índice cresce. Logo, este modelo indicou as necessidades de reflorestar a área urbana, em vezes o estágio atual, contudo devido às limitações inerentes aos espaços urbanos de Feira de Santana é preciso utilizar novas perspectivas de reflorestamento, como a utilização de telhados verdes, por exemplo.

Referências

- Aldogom, D. et. al. Remote sensing and GIS approach for environmental green áreas planning using Landsat satellite imagery, Dubai-UAE. Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XI, v. 11534, 2020. DOI: 10.1117/12.2573904
- Amaral, T. L.; Ribeiro, J. N. A. Geoprocessamento na Construção do Índice de Bem-estar Social (IBES). Revista Tamoios, 2024. DOI: 10.12957/tamoios.2024.79539.
- Arruda, L. E. V.; Silveira, P. R. S; Vale, H. S. M.; Da Silva, P. C. M. Índice de área verde e de cobertura vegetal no perímetro urbano central do município de Mossoró, RN. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Mossoró, RN, v. 8, n. 2, p. 13-17, 2013.
- Bolund, P. Hunhammar, S. Ecosystem services in urban áreas. Ecological Economics, V. 29, p.293-301, 1999.
- Bratsberg, A.; Thoresen, M.; Ghosh, A. Exponential consistency of M-estimators in generalized linear mixed models. Journal of Statistical Planning and Inference, v.235, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2024.106222>
- CEPLAC/ CEI/ SEPLANTEC. Atlas climatológico do Estado da Bahia - vol.3. Balanço hídrico, Salvador, 1975.

- Charnet, R.; Bonvino, H; Freire C. A. L; Charnet, E. M. R. *Análise de modelos de regressão linear com aplicações*. Campinas, SP: Unicamp, 1999.
- Dang, H. A. N et. al. Social impact of green roofs. *Frontiers in Built Environment*, vol. 15, no. 4, pp. 76-94, 2022. DOI: 10.3389/fbuil.2022.1047335
- Estação climatológica. Banco de Dados Meteorológicos 1981 – 2010. Feira de Santana: UEFS / DTEC / INMET, 2020.
- Faustino, V. B. et. al. *Análise dos Indicadores de Cobertura Vegetal e a Distribuição de Renda do Município de Sorocaba*. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019. ISBN: 978-85-17-00097-3.
- Garcia, B. H. Y et. al. Índices de Área Verde e Cobertura Vegetal Para Bairros do Município de Rondonópolis – MT. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2018.
- Gomes, M. F. Queiroz, D. R. E. Avaliação da Cobertura Vegetal Arbórea na Cidade de Birigui com Emprego de Técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. *Revista Geografar*. Curitiba, v.6 n.2, p.93-117, 2011
- Guo, F. et. al. The Mechanism of Street Spatial Form on Thermal Comfort from Urban Morphology and Human-Centered Perspectives: A Study Based on Multi-Source Data. *Buildings*, v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14103253>
- Harder, I. C. F.; Ribeiro, R. de C. S.; e Tavares. Índice de área verde e cobertura vegetal para as praças do município de Vinhedos. *Revista Árvore*, v. 30, nº 2, p.277-282. 2006.
- He, R. et. al. Plant diversity value of informal green spaces in tropical coastal urban areas: An empirical study of species, functional, and phylogenetic diversity. *Science of the Total Environment*, v. 955, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176741>
- Hussien, A. et. al. A holistic plan of flat roof to green-roof conversion: Towards a sustainable built environment. *Ecological Engineering*, v. 190, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106925>.
- IBGE. Censo Demográfico 2000. <Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/home/download/estatistica.shtm> > Acesso em 10 de janeiro de 2020.
- Jim, C. Y. Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, v.40, p.235-249, 1998.
- Khalili, S.; Kumar, P.; Jones, L. Evaluating the benefits of urban green infrastructure: Methods, indicators, and gaps. *Heliyon*, v.10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38446>
- Kocan, N. Determinação da expansão urbana em rede ecológica usando análise de borda: um estudo de caso de Usak (Turquia). *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 29 (3), 187-199, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3846/jeelm.2021.14643>
- Kumar, P. et. al. Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: Drivers, effectiveness, and future needs. *The Innovation*, v. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100588>
- Levine, D.M.; Berenson, M. L.; Stephan, D. *Estatística: Teoria e aplicações*. Rio de Janeiro, LTC, 2000.
- Liou, D. G. et. al. Linear Regression Model for Predicting Allyl Alcohol C–O Bond Activity under Palladium Catalysis. *ACS Catalysis*, v. 12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c03847>
- Liou, Y. A. et. al. Human-greenspace interactions with outdoor air: Landscape metric and PLS-SEM approach. *Journal of Cleaner Production*, v.469, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143077>
- Lombardo, M. A. *Ilha de Calor nas Metrópoles – o exemplo de São Paulo*. São Paulo: HUCITEC, 1985.
- Martins, G. E. Coeficiente de correlação amostral. *Revista de Ciência Elementar*, (2014) 2(02):0069
- Milano, M. S. *Curso sobre arborização urbana*. Curitiba: Universidade Livre do Meio Ambiente, 1995.
- Morawska, L. et. al. The state of science on severe air pollution episodes: Quantitative and qualitative analysis. *Environment International*, v. 156, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106732>
- Nieuwenhuijsen, M. et al. Shaping urban environments to improve respiratory health: 1797

- recommendations for research, planning, and policy. **The Lancet Respiratory Medicine**, v. 12, n. 3, p. 247-254, 2024. DOI: 10.1016/S2213-2600(23)00329-6
- Nucci, J. C. Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de ecologia e planejamento da paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília (MSP). São Paulo, Humanistas, 124p. 2001.
- Nowak, D. J. et. al. Measuring and analyzing urban tree cover. *Landscape and Urban Planning*, v.36, p.49-57, 1996.
- Oke, T. R. City Size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment Pergamon Press*. V. 7 p. 769-779. 1973.
- Pan, L. et. al. Time series sUAV data reveal moderate accuracy and large uncertainties in spring phenology metric of deciduous broadleaf forest as estimated by vegetation index-based phenological models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 218, p. 339-351, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.09.023>
- Paula, G. A. Modelos de Regressão com Apoio Computacional. São Paulo: Disponível na home-Page do autor e tesouraria do IME-USP, 2013. v. 1. 253p. disponível em: https://www.ime.usp.br/~giapaula/texto_2013.pdf. Acessado em 15/07/2002.
- Penkova, I. F. G.; Zimmerman, J. K.; González, G. Green roofs in the tropics: design considerations and vegetation dynamics. *Heliyon*, v. 6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04712>
- Pereira, L. A.; Loboda, C. R. O Canteiro Central da Avenida Minas Gerais: Uma Análise a Partir das Demandas Demográficas de Usuários do Entorno. *Revista Caminhos de Geografia*, v. 21, n. 76, p. 28-41, 2020. DOI: <http://doi.org/10.14393/RCG217646630>
- Prion, S. K., & Haerling, K. A. Making sense of methods and measurements: Simple linear regression. *Clinical Simulation in Nursing*, 48(C) (2020, November), 94-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecns.2020.07.004>.
- Prion, S. K., & Haerling, K. A. Making. Making Sense of Methods and Measurement: Pearson Product-Moment Correlation Coefficient. In *Clinical Simulation in Nursing*. (10) 587-588, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecns.2014.07.010>.
- Santos, C. V. B. et. al. Avaliação do índice de área foliar e índice de área da planta em floresta seca utilizando modelos simplificados em imagens de alta resolução com o uso de VANT. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* v. 12., n. 03, p. 109-123, 2022.
- Santos, R. L. Evolução das vertentes e pedogênese nos bordos dos tabuleiros de Cruz das Almas (BA). Dissertação de Mestrado em Geociências. Salvador: UFBA, 1993.
- Silva, A. D. P. Santos, A. F. dos. Oliveira, L. M. Índices de área verde e cobertura vegetal das praças públicas da cidade de Gurupi, TO. *Floresta, Curitiba, PR*. v. 46, n. 3 p.353 – 361, 2006. DOI: 10.5380/rr.v46i3.40052
- Shavelson R. Statistical reasoning for the behavioral sciences. Allyn and Bacon, Boston, 1996.
- Souza, L. F. et. al. Caracterização de Áreas Verdes Urbanas no Município de Goianorte/TO. *Revista Novos Desafios, Guaraí*, v. 1, n. 1, p. 71-82, 2021.
- Subramanian, A. Coutinho, A. S. Silva, L. B. Aplicação de métodos e técnicas multivariadas para previsão de variáveis termoambientais e perceptivas. *Produção*, v. 17, n. 1, p. 052-070, Jan./Abr. 2007.
- Sudha, P. e Ravindranath, N. H. A study of Bangalore urban Forest. *Landscape and Urban Planning*, v47, p.47-63, 2000.
- Sukopp, H. & Werner, P. *Naturaleza en las ciudades*. Madrid, 1991.
- Tagliarini, F. S. N. et. al. Imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado Aplicadas na Obtenção do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada. *Energia na Agricultura, Botucatu*, v. 36, n. 1, p. 111-122, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.17224>
- Taylor R. Interpretation of the correlation coefficient: A basic review. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*. 1990; 1: 35-39.
- Tyrväinen, L. The amenity value of the urban Forest: an application of hedonic pricing method. *Landscape and Urban Planning*, V. 37, p.211-222, 1997.
- Zanin, E. M.; Rosset, F.; Dalavale, L. C. Índice de Áreas Verdes Públicas para o município de Getúlio Vargas-RS. VIII Congresso de Ecologia do Brasil, Caxambu-MG, 2007.

- Zhang, X. et. al. New research methods for vegetation information extraction based on visible light remote sensing images from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, v.78, p.215-226, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.001>
- Yan, Y. et. al. How do landscape patterns affect cooling intensity and scale? Evidence from 13 primary urban wetlands in China. *Ecological Indicators*, v. 166, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112574>
- Yang, Z.; Zhang, S.; Li, F. The spatio-temporal dynamic evolution and variability pattern of urban green resilience in China based on multi-criteria decision-making. *Sustainable Cities and Society*, v. 116, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105887>